

主成分分析を用いたあり得る指先構造の合成

Synthesizing possible variations of fingertips using principal component analysis

野原 健(中大) 多田 充徳(産総研) 梅田 和昇(中大) 持丸 正明(産総研)

Ken Nohara¹ Mitsunori Tada² Kazunori Umeda¹ Masaaki Mochimaru²

¹ Faculty of Science and Engineering, Chuo University

² Digital Human Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

In order to synthesize possible variations of fingertip, we analyzed individual differences in geometry of skin, distal phalanx and middle phalanx using principal component analysis. Volume registration technique was employed to quantify individual differences of fingertip from MR images of 50 male subjects. As a result of the analysis first, second and third components are turned out to correspond to difference in length, contortion and warpage of fingertip. Possible variations of fingertip was synthesized from these three components.

Key Words : MRI, non-rigid registration, principal component analysis, individual difference

1 はじめに

工業製品の操作性や安全性を設計段階で評価するために、人の力学挙動のコンピュータシミュレーションが行われている。このようなシミュレーションに用いられる人体構造モデルとしては、情報通信機構の数値人体モデル¹⁾や豊田中央研究所のバーチャル人体モデル²⁾などが挙げられる。

これらのモデルは平均的な人体形状を再現しているだけで、個人差に相当するバリエーションが存在しない。しかし、操作性や安全性の評価を行うためには、平均的なモデルだけでは不十分である。ある製品に対して最も操作しにくい人、最も危険な人でも最低限の基準を満たすことを示さなければならないからである。

一般的に人体構造モデルを作成するためには、医用画像に対する領域分割のような自動化の難しい作業が多く実施しなければならない。このため、多数の人体モデルの作成には、莫大なる人的・時間的コストが必要になる。また網羅的なシミュレーションを行うためには被験者1と被験者2の中間的な形状といったように、あり得る人体構造を生成する必要がある。

そこで、本稿ではMRIで撮像した医用画像を用いて個人差を迅速に定量化する手法、それらに対し主成分分析を施すことで個人差を分析する手法、そして主成分の線形和としてあり得る人体構造を合成する手法を提案する。

2 研究概要

本稿では操作性の評価を行う際に必要となる指先を対象とする。個人差を定量化するためには、指先の形状を非侵襲に計測する必要がある。本研究ではMRIを用いて指先を撮像した。このMR画像からあり得る指先構造を合成するまでの流れを図1に示す。

基準指先モデルの作成 MRIで撮像したデータの中の一つを基準指とし、手作業で領域分割を行った後に指先表面、末節骨、そして中節骨のポリゴンモデルを作成する。以下これらの3部位を指先構造と呼ぶ。

個人差の定量化 撮像したMR画像に対してポリウムレジストレーションを施し、指先構造の個人差を変位場として定量化する。

個人差の分析 変位場に対して主成分分析を施すことで、個人差の主成分を求める。すなわち個人差の特徴を明らかにする。

あり得る指先構造の合成 主成分分析で求めた個人差の主成分の線形和を計算することで、あり得る指先構造を合成する。

ポリウムレジストレーションを用いることで、形状の個人差を迅速に定量化することが可能になる。また輝度勾配を用いた対応点探索を行うため、データ間の解剖学的特徴がほぼ一致する。即ち、計算した変位場に対して主成分分析を施すことで、個人差を分析することが可能となる。主成分分析の結果、個人差の特徴を表す主成分が変位場として求まる。最終的に、この変位場に従って基準モデルを変形させるだけ迅速かつ簡便にあり得る指先構造を合成することができる。

3 個人差の定量化

3.1 指先の撮像 ポリウムデータの撮像には磁場強度4.7 Tの実験用MRI(Unity INOVA, Varian)を使用した。撮像を短時間に行うために3次元グラディエントエコーシーケンスを選択し、TRを20 msec、TEを10 msec、FOVを120 × 30 × 30mm、解像度を512 × 128 × 128に設定した。以上の設定で1回の撮像には約5分を要した。

この撮像には20代前半から30代後半の日本人男性50名が被験者として参加した。撮像中に指先が動く画質が劣化するため、被験者の指を自然に伸ばした状態で固定し撮像を行った。

3.2 前処理 取得した全ての指先画像に対して以下の3つの前処理を施した。図2に処理の手順を示す。

1. 中節骨の端部から基節骨側2.54mm以降をトリミング
2. 指先領域が画像の中央に位置するように並進・回転させた後に、ポリウムを256 × 128 × 128にリサイズ
3. 3 × 3 × 3のガウシアンフィルタを用い平滑化

3.3 ポリウムレジストレーション ポリウムレジストレーションとは、ポリウム間の類似度が最大になるように、あるポリウムデータを同じ対象を撮像した別のポリウムデータに対応づけるための写像を求める手法である。本研究ではSzeliskiらが提案した2次元画像に対するレジストレーション手法³⁾を、3次元に拡張した⁴⁾ものを採用した。

この手法では、ポリウムの類似度指標としてSSDを用いる。またポリウム中に等間隔に並ぶ制御点でのみ変位が定義される。少ない変数で変位場を記述できるため、計

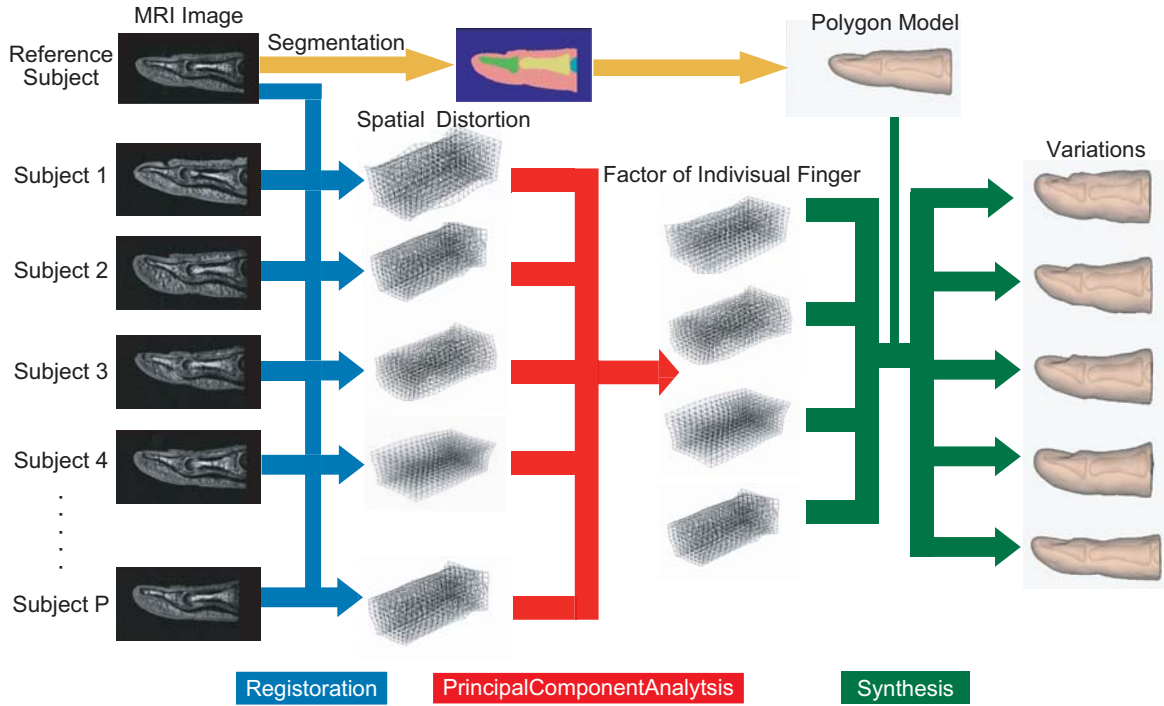


Fig. 1: Synthesis of possible variations of fingertip.

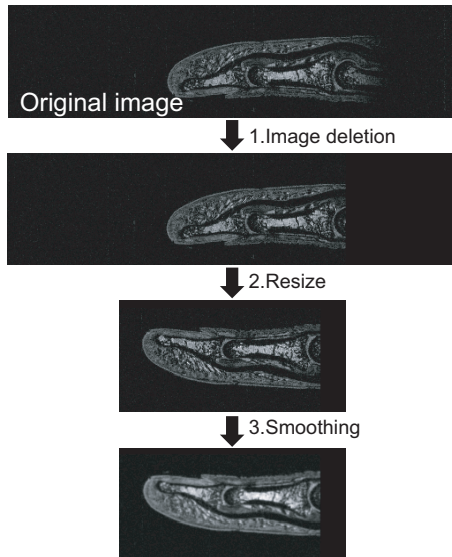


Fig. 2: Preprocesses for MR image.

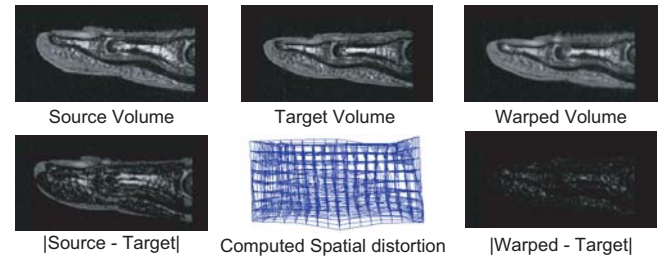


Fig. 3: Result of volume registration.

主成分分析を施す．具体的には，レジストレーションによって計算された基準被験者から被験者 k への変位場が n 個の制御点で構成されているとする．ここで i 番目の制御点の変位を (x_i, y_i, z_i) とすると，変位場全体を式 (1) のように長さ $3n$ のベクトルとして表す．

$$\mathbf{d}_k = (x_1 \ y_1 \ z_1 \ \cdots \ x_n \ y_n \ z_n) \quad (1)$$

次に，式 (2) のように，各行が各被験者の変位場を表す行列 F を作成する．

$$F = \begin{pmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{d}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{d}_p \end{pmatrix} \quad (2)$$

最後に F に対して主成分分析を施す．即ち， F の共分散行列を求め，これに対して特異値分解を施すことにより各主成分を求める．

4.2 結果 4.1 節で説明した主成分分析により求められた寄与率と累積寄与率を図 4 に示す．

この結果から，上位 14 個の主成分で全分散の 9 割以上を

算コストの低減とレジストレーションの安定化とを同時に達成できる．

ポリウムレジストレーションを行うことで図 3 に示すソースデータをターゲットデータへと変形させるための変位場が求まる．制御点の間隔はどの方向にも 16 pixel と設定した．ポリウムのサイズが $256 \times 128 \times 128$ であるため，全 1377 点で変位が計算される．この変位場こそが，指先構造の個人差となる．

4 個人差の分析

4.1 概要 指先構造の個人差を明らかにするとともに，個人差を基準指からの変位場で表すために，変位場に対して

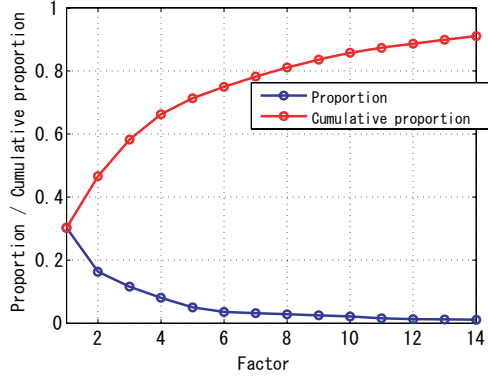


Fig. 4: Proportion and cumulative proportion computed from PCA result.

説明していることが分かる．4.3節では，第1主成分から第3主成分について，指先のどのような形状に対応しているのかを調べる．また，5.1節ではある被験者の指先モデルを上位3主成分の線形和で合成しその再現性を検証する．最後に5.2節では重み係数が取り得る範囲を決定し，ありうる指先構造を合成する．

4.3 指先構造の個人差 上位3主成分が指先のどのような形状に対応しているのかを明らかにするために，主成分とそれに従い変形させた基準モデルを可視化する．

レジストレーションで計算した変位場の平均を式(3)のように m とする．

$$m = \sum_{i=1}^p \frac{d_i}{n} \quad (3)$$

また i 番目の固有ベクトルを式(4)のように c_i とする．

$$c_i = (c_{i1} \ c_{i2} \ c_{i3} \ \cdots \ c_{in}) \quad (4)$$

以上より，第 i 主成分に対応する変位場 s_i は式(5)のように表される．

$$s_i = m + \alpha_i c_i \quad (5)$$

ただし， α_i は重み係数である．

第1から第3主成分について， α_i を正負に変化させた時に得られる変位場と，それに従い変形させた基準モデルを図5に示す．この図より，第1主成分は指先の長さ，第2主成分は指先の先端の捩れに，そして第3主成分は指先の上下方向の反りを表していることが分かった．5.1節では，これら3主成分を用いてあり得る指先構造を合成し，その再現性を検証する．

5 あり得る指先構造の合成

5.1 指先モデルの合成 本節では，主成分の線形和で表された指先モデルの再現性を調べる．そのために，被験者1の指先構造を上位3主成分の線形和として合成する．まず第1主成分から第3主成分の重み係数を求める．つまり，式(6)に従い，各主成分に対する重み係数 α_i を計算する．

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} (d_1 - m)^t \quad (6)$$

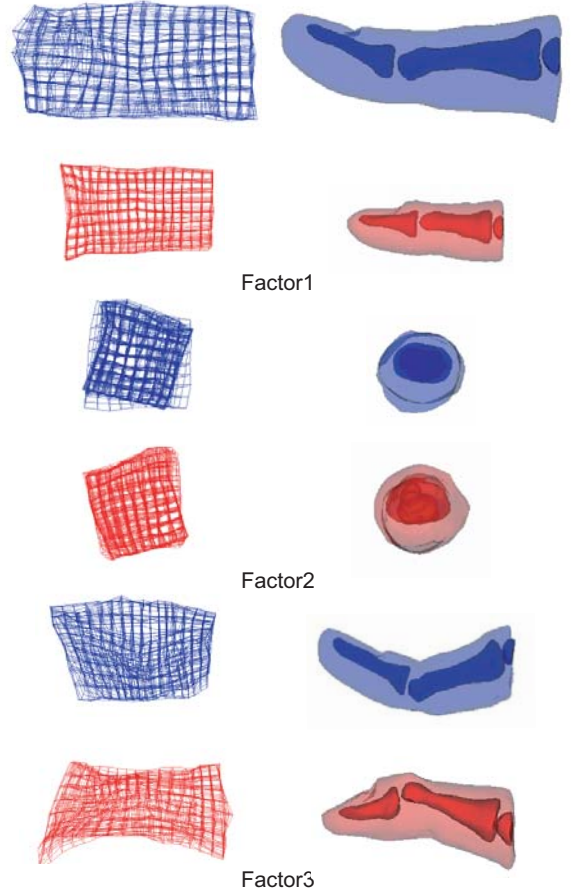


Fig. 5: Visualization of each principal component.

Table 1: Average error and standard deviation between synthesized model and manually created model.

	Average error	Standard deviation
Skin	0.642 mm	0.603 mm
Distal phalanx	0.345 mm	0.940 mm
Middle phalanx	0.193 mm	0.403 mm

式(6)から求めた各重み係数を用いて主成分の線形和を計算し，この変位場に従って基準モデルを変形させる．一方，同一被験者のMR画像に対して手作業で領域分割を施し，指先構造モデルを作成する．これらの一致度をカラーマップを用いて表示したものを図6に，各部位の平均誤差と標準偏差を表1に示す．

図6がら明らかなように，指先や末節骨の腹面における誤差が大きいことが分かる．これは第1主成分から第3主成分の中に，指の腹の形状を表す成分が含まれていないからである．

5.2 各主成分の重み係数の範囲と指先の合成 各主成分の重み係数の範囲を特定することで，あり得る指先構造を主成分の線形和で表現することが可能となる．各被験者における各主成分の重み係数を式(7)に従い計算する．

$$A = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 - m \\ d_2 - m \\ \vdots \\ d_p - m \end{pmatrix}^t \quad (7)$$

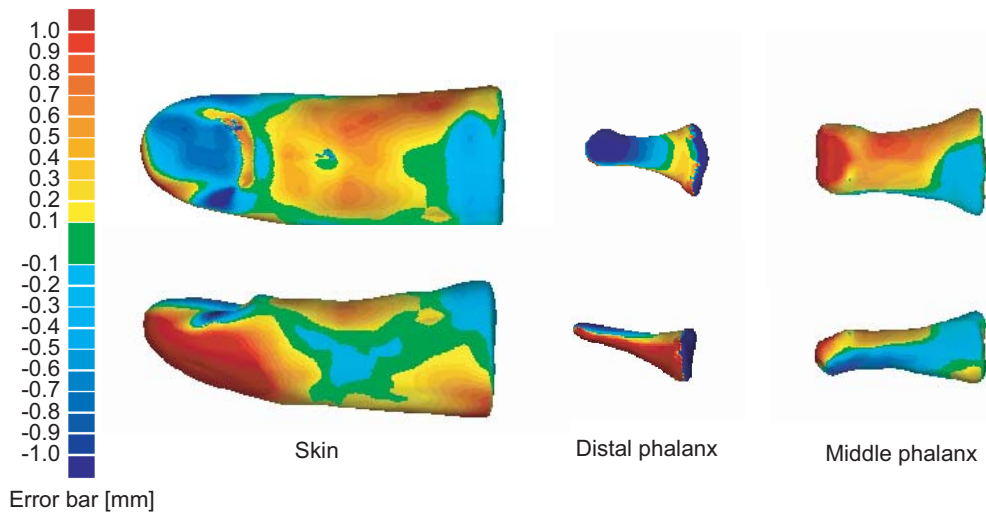


Fig. 6: Error between synthesized model and manually created model.

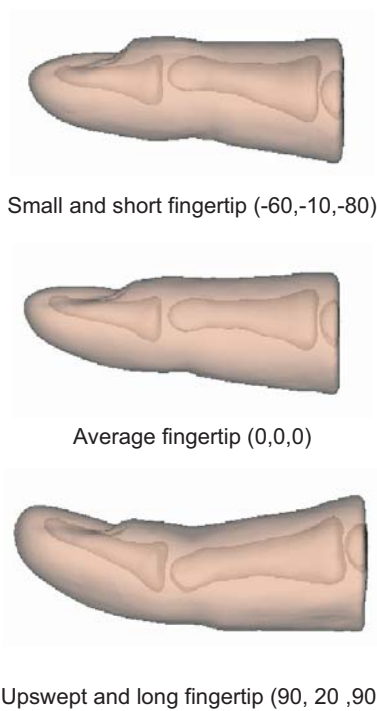


Fig. 7: Three possible variations of fingertip.

A の各列が各主成分の重み係数となっている。即ち、第 i 列の最小値と最大値が第 i 主成分の重み係数が取り得る範囲となる。ここでは、第 1 主成分から第 3 主成分までの範囲を求めた。第 1 主成分は -61.99 から 98.51、第 2 主成分は -28.12 から 26.16、第 3 主成分は -97.08 から 95.02 となった。

図 7 に第 1 主成分から第 3 主成分まで用いて合成したあり得る指先構造を示す。第 1 主成分から第 3 主成分の重み係数の値を $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ とするとき、 $(-60, -10, 80)$ とすると小さく短い指が合成でき、 $(90, 20, 90)$ とすると上向きに反った長い指が合成できた。また、 $(0, 0, 0)$ の場合、平均的な指先モデルを合成できる。このように主成分の線形和として表した変位場を用いることにより、様々なバリエーションの指先構造モデルを迅速かつ簡単に合成することができる。

6 結論

人体構造の個人差を定量化・分析・合成する手法を構築した。個人差の定量化には、MR 画像に対するボリュームレジストレーションを用いた。つまり、人体構造の個人差を変位場として定量化した。分析には主成分分析を用い、ここで計算した主成分の線形和からあり得る人体構造を合成した。

実際に指先の MR 画像に対して提案手法を適用した結果、第 1 主成分が指の長さに、第 2 主成分が指先の先端の擦れに、そして第 3 主成分が指の上下方向の反り方に対応することが分かった。また第 1 主成分から第 3 主成分の 3 つの主成分を用いるだけでも、様々なバリエーションのモデルが迅速に合成できた。

参考文献

- 1) 独立行政法人情報通信機構,
<http://www2.nict.go.jp/pub/whatsnew/press/010426/010426.html>
- 2) 株式会社豊田中央研究所,
<http://www.tytlabs.co.jp/japanese/tech/thums/index.html>
- 3) R. Szeliski and J. Coughlan. "Spline-Based Image Registration", International Journal of Computer Vision, vol.22,no.3,pp.199-218,1997.
- 4) Mitsunori Tada, Hiroaki Yoshida, Masaaki Mochimaru and Takeo Kanade: Generating Subject-Specific FE Models of Fingertip with the Use of MR Volume Registration, in Proceedings of Eurohaptics2006, pp.99-104, 2006.